

УДК 669.017:621.771.294

ДОСЛІДЖЕННЯ ЗВ'ЯЗКУ МІЖ ХІМІЧНИМ І ФАЗОВИМ СКЛАДОМ ТА В'ЯЗКІСТЮ РУЙНУВАННЯ СТАЛІ ЗАЛІЗНИЧНИХ КОЛІС

О. І. БАБАЧЕНКО, Г. А. КОНОНЕНКО, Р. В. ПОДОЛЬСЬКИЙ,
О. А. САФРОНОВА, О. Л. САФРОНОВ, Ж. А. ДЕМЕНТЬЄВА

Інститут чорної металургії ім. З. І. Некрасова НАН України, Дніпро

Досліджено вплив структурного стану на комплекс властивостей металу залізничного колеса. Встановлено кореляційні зв'язки між його характеристиками. Виявлено негативний вплив структурної неоднорідності на в'язкість руйнування K_{IC} вуглецевої сталі залізничних коліс ($C \sim 0,47 \text{ mass\%}$). Показано, що бейніт у структурі сталі в кількості від 10 до 15% призводить до зниження в'язкості руйнування K_{IC} на 25...36% порівняно з рівномірною феритно-перлітною структурою (підвищення кількості бейніту в структурі в середньому на 1% викликає зниження в'язкості руйнування на 2,7%).

Ключові слова: залізничні колеса, механічні властивості, мікроструктура, хімічний склад.

The influence of the structural state on the set of properties of the railway wheel metal was studied. Correlation between metal characteristics was established. The negative impact of structural heterogeneity on the fracture toughness of K_{IC} of carbon steel for railway wheels ($C \sim 0.47 \text{ mass\%}$) was established. It is shown that bainite in the steel structure in the amount of 10 to 15% leads to a decrease in the fracture toughness of K_{IC} by 25...36% in comparison with this characteristic for the steel with a uniform ferrite-pearlite structure (an increase in the amount of bainite in the structure on average by 1% causes a decrease in fracture toughness by 2.7%).

Keywords: railway wheels, mechanical properties, microstructure, chemical composition.

Вступ. Відомо, що в'язкість руйнування є характеристикою матеріалу, яка залежить від хімічного складу та структури сталі [1, 2]. Критичний коефіцієнт інтенсивності напружень K_{IC} в умовах плоскої деформації дає можливість оцінити вплив хімічного складу, домішок, умов обробки, структури та інших чинників на в'язкість руйнування для підвищення надійності виробів. Встановлено [3, 4] структурну чутливість коефіцієнта інтенсивності напружень колісних сталей і показано, що залежно від їх структурного стану, який визначають хімічним складом і режимами термічної обробки коліс, в'язкість руйнування K_{IC} може змінюватися в широких межах.

Відсутність однозначного зв'язку тріщиностійкості з іншими механічними властивостями змушує виконувати подальші дослідження для встановлення закономірностей впливу цих чинників на характеристики тріщиностійкості. Вже накопичено великий експериментальний матеріал, який дає змогу деякі з них сформулювати. Розчинні в основі за способом заміщення домішки і легувальні елементи, судячи з наявних нечисленних результатів, впливають на в'язкість руйнування несуттєво. Водночас навіть малі домішки можуть значно знижувати тріщиностійкість [5].

Хімічний склад та умови термообробки залізничних коліс залежать від марки сталі та сфери їх застосування [6]. Багато чинників можуть впливати на вибір

матеріалу для них – необхідний рівень зносостійкості, міцності та витрати на виробництво сталі. У будь-якому разі мікроструктура відповідає за рівень механічних властивостей, зокрема, за в'язкість руйнування [6].

Одним з основних видів термічної обробки вуглецевих сталей перлітного класу є прискорене охолодження з аустенітної області для формування структури пластинчастого перліту. Таку термічну обробку застосовують для зміцнення різних виробів під час промислового виробництва [7–9].

Залізничні колеса після термічного зміцнення мають феритно-перлітну структуру. Перліт складається з пластин (ламелів) цементиту (Fe_3C) та фериту. Відомо, що зменшення міжпластинкової відстані у перлітній структурі можна досягнути, застосувавши ефективні режими термічної обробки, додаткове легування (мікролегування) сталі, або збільшивши ступінь обтиснення [10, 11].

Раніше показано, що швидкість охолодження ободу залізничного колеса під час термічної обробки зазвичай не перевищує 10°C/s у його поверхневих шарах [12–14]. Без термічного зміцнення цей показник може знизитися, що призведе до менш дисперсних структур перліту.

Методика досліджень. Для лабораторних термічних обробок з ободів залізничних коліс $\varnothing 957$ mm у гарячекатаному стані вирізали проби. Режими обробки відрізнялися тільки швидкістю охолодження з аустенітної області. Її змінювали охолодженням у різних середовищах: на повітрі (нормалізація), розплавленій солі ($t_{\text{salt}} = 250^\circ\text{C}$) і оливі. Дослідження температурних полів дослідних проб за допомогою зачеканих термопар показали, що їхня середня швидкість охолодження становить: 1°C/s (на повітрі), 6°C/s (в солі) та 10°C/s (в оливі). Температура нагріву дослідних проб однакова для всіх варіантів термічної обробки і становила 850°C .

Для дослідження впливу розміру зерна на механічні властивості нагрівали сталі № 1–3 (табл. 1) до різної температури (850 та 1000°C) з подальшим охолодженням (швидкість охолодження 1°C/s).

Металографічні дослідження сталей виконували за допомогою світлового мікроскопа Axiovert 200 M MAT та растрового електронного мікроскопа РЕМ-106. Визначали мікроструктуру та характер хімічної неоднорідності зі застосуванням 2...3%-го спиртового розчину азотної кислоти (HNO_3), а перлітну структуру – хромовим ангідридом (CrO_3) та розчином крижаної оцтової кислоти (CH_3COOH). Кількісний аналіз параметрів мікроструктури здійснювали за допомогою системи автоматичного аналізу зображення “AxioVision” та “ImageJ”. Механічні випробування виконували за стандартною методикою зі застосуванням розривної машини типу TTDL “Instron” та циліндричних зразків діаметром робочої частини 5 mm, похибка визначення зусилля $\pm 1\%$. Визначали ударну в'язкість за стандартною методикою з використанням маятникового копра ПСВ-30.

Досліджували характеристики тріщиностійкості залізничних коліс поточного виробництва, відповідно до методики [7], на компактних зразках завтовшки 30 mm. Тріщини наводили на гідропульсуючій випробувальній машині типу ЕДЦ-20.

Для визначення впливу хімічного складу, структурного стану сталі на службові та експлуатаційні характеристики застосували методику парної кореляції за допомогою Excel.

Результати досліджень. Вивчали вплив швидкості охолодження (V_0) в інтервалі $1...10^\circ\text{C/s}$ для вуглецевих сталей залізничних коліс різного хімічного складу (табл. 1) на формування їх структурного стану та комплексу механічних властивостей (табл. 2). Мікроструктура досліджуваних сталей після охолодження зі швидкостями 1; 6 та 10°C/s є феритно-перлітна з невеликою кількістю структурно вільного фериту, який виділяється у вигляді сітки на межах колишніх аустенітних зерен, розмір яких відповідав 7–8 номеру.

Таблиця 1. Параметри структури досліджуваних вуглецевих сталей

Умовне позначення	Вміст хімічних елементів, mass%	Швидкість охолодження (V_0), °C/s	Співвідношення ферит (F)/перліт (P), %	Дисперсність перліту (S_0), μm
Сталь 1	C = 0,48 Mn = 0,69 Si = 0,32 Cr = 0,09 P = 0,011 S = 0,009	1	25 / 75	0,1834
		6	15 / 85	0,1588
		10	7 / 93	0,1223
Сталь 2	C = 0,57 Mn = 0,73 Si = 0,33 Cr = 0,13 P = 0,014 S = 0,011	1	15 / 85	0,2017
		6	5 / 95	0,1673
		10	3 / 97	0,1222
Сталь 3	C = 0,64 Mn = 0,74 Si = 0,31 Cr = 0,11 P = 0,019 S = 0,022	1	8 / 92	0,2061
		6	3 / 97	0,1745
		10	1 / 99	0,1315

Таблиця 2. Механічні властивості досліджуваних вуглецевих сталей

Умовне позначення	Швидкість охолодження, °C/s	Механічні властивості					
		σ_B	$\sigma_{0,2}$	δ	ψ	KCU , J/cm ²	K_{IC} , MPa·m ^{1/2}
		MPa		%			
Сталь 1	1	753	427	24	48	38,7	71,6
	6	814	507	25	47	45,6	86,5
	10	906	591	19	47	51,5	92,6
Сталь 2	1	843	468	20	38	27,0	59,5
	6	989	583	15	37	33,6	65,9
	10	1020	651	12	37	36,7	70,9
Сталь 3	1	906	475	15	33	21,3	51,0
	6	1058	727	13	33	36,8	63,8
	10	1125	816	10	32	31,2	64,1

Зміна структурного стану та хімічного складу досліджуваних сталей внаслідок прискореного охолодження вплинула на критичний коефіцієнт інтенсивності напружень K_{IC} та інші механічні властивості (табл. 1 і 2).

Виконано кореляційний аналіз для визначення зв'язку між вмістом хімічних елементів в сталі, швидкістю охолодження, фазовим складом та механічними властивостями. Коефіцієнт кореляції Пірсона застосовують у статистиці як показник кореляції (лінійної залежності) між двома змінними X та Y , який набуває значень від -1 (зворотний зв'язок) до $+1$ (прямий) включно. Залежно від коефіцієнта кореляції зв'язок може мати одну з оцінок: $0,1 \dots 0,3$ – слабкий; $0,3 \dots 0,5$ – помітний; $0,5 \dots 0,7$ – помірний; $0,7 \dots 0,9$ – високий; $0,9 \dots 1$ – вельми високий.

В результаті аналізу встановлено, що є високий зв'язок між швидкістю охолодження (V_0 , °C/s) та кількістю структурно вільного фериту (F, %) і перліту (P, %). Це пояснюємо пригніченням утворення доєвтектоїдного фериту за підвищення швидкості охолодження. При цьому між V_0 і міжпластинчастою відстанню перліту (S_0 , μm) встановлено вельми високий зворотний зв'язок (коефіцієнт кореляції

–0,96). Такий вплив пояснюємо тим, що за збільшення швидкості охолодження відбувається стоншення як феритних, так і цементитних пластин перліту, зменшуючи цим міжпластинчасту відстань. Підвищення швидкості охолодження досліджуваних сталей призводить до зростання їх границі плинності ($\sigma_{0,2}$).

Збільшення кількості перліту має вельми високий зв'язок зі зростанням границі міцності (σ_B), високий зв'язок зі збільшенням границі плинності ($\sigma_{0,2}$) та зменшенням відносного видовження (δ) та звуження (Ψ). Зміна кількості фериту має такий же рівень зв'язку зі зміною вказаних властивостей, але при цьому має зворотний характер. Ферит є м'якою та пластичною структурною компонентою, тому такий напрямок впливу на основні механічні властивості є цілком природний.

Слід відзначити, що в досліджуваних межах режимів термічного оброблення, співвідношення кількості фаз та міжпластинчастої відстані зміна в'язкості руйнування не має високого кореляційного зв'язку. Натомість встановлено високий зворотний кореляційний зв'язок в'язкості руйнування та вмісту хімічних елементів у сталі, зокрема, вуглецю, марганцю та фосфору. Також виявлено високий кореляційний зв'язок за збільшення вмісту сірки та зменшення відносного видовження і звуження.

Розмір зерна, згідно з експериментальними результатами, неоднозначно пов'язаний з в'язкістю руйнування. Найчастіше K_{1C} зростає за його подрібнення. Дослідження показали, що з подрібненням зерна підвищуються механічні характеристики сталі залізничних коліс – міцнісні (σ_B , $\sigma_{0,2}$), пластичні (δ , Ψ) та ударна в'язкість (KCU), а також в'язкість руйнування (табл. 3).

Таблиця 3. Стандартні механічні характеристики вуглецевих сталей із різним розміром дійсного зерна

Умовне позначення	Температура нагріву, °C	Середній розмір зерна <i>d</i> , mm	Механічні характеристики					
			σ _B	σ _{0,2}	δ	ψ	<i>KCU</i> , J/cm ²	<i>K</i> _{1C} , MPa·m ^{1/2}
			MPa		%			
Сталь 1	850	0,123	738	412	19	24	16,7	56,7
	1000	0,0275	753	427	24	48	53,5	76,8
Сталь 2	850	0,117	810	445	15	19	11,0	44,8
	1000	0,0285	840	468	19	38	24,7	59,5
Сталь 3	850	0,112	866	476	15	20	9,4	44,4
	1000	0,0289	903	487	15	33	23,1	51,0

Підвищення в'язкості руйнування K_{1C} за такої зміни структури пояснюємо тим, що одночасно зростає і міцність, і пластичність. До того ж збільшення кількості меж зерен на шляху внутрішньокристалічної тріщини ускладнює її переміщення.

Під час аналізу кореляційного зв'язку між досліджуваними показниками (табл. 3) виявили вельми високий прямий зв'язок в'язкості руйнування та відносних видовження і звуження та ударної в'язкості (рис. 1). Щодо зміни розміру зерна (d , μm), то він має помірний зв'язок зі зміною в'язкості руйнування. Інші показники мали слабкий кореляційний зв'язок, тому на рис. 1 не подані.

Також дослідили причини розкиду значень в'язкості руйнування K_{1C} по колу обода залізничного колеса, виготовленого зі сталі марки ER7 (C = 0,47%, Si = 0,30%, Mn = 0,75%). Коефіцієнти в'язкості руйнування по перерізу дослідного колеса такі (МПа·м^{1/2}): зразок № 1 – 99,6; № 2 – 83,7; № 3 – 106; № 4 – 78; № 5 – 77,9; № 6 – 85,3. Вивчили мікроструктуру випробуваних зразків. Мікроструктурний аналіз виконали на шліфах, які виготовлені з компактних зразків після випробувань на в'язкість руйнування K_{1C} . Досліджували на чотирьох зразках з різним рівнем в'язкості руйнування K_{1C} (зразок № 3 – максимальне значення K_{1C} ; № 4 та 5 – мінімальні значення K_{1C} ; № 6 – найближче до середнього значення K_{1C}).

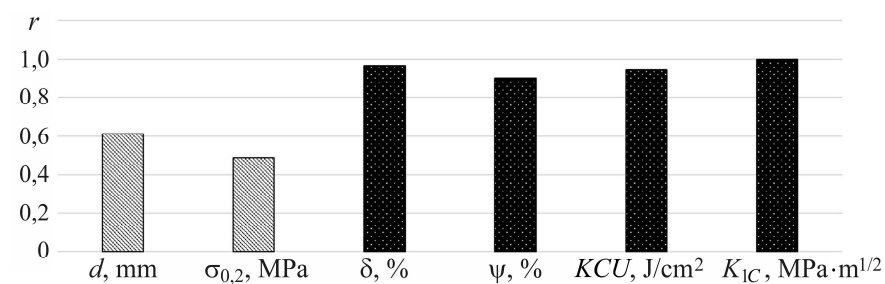


Рис. 1. Коефіцієнт парної кореляції (r) між в'язкістю руйнування та розміром зерна й іншими механічними властивостями: ▨ – зворотний зв'язок; ■ – прямий.

Fig. 1. The pair correlation coefficient (r) between fracture toughness and grain size and other mechanical properties: ▨ – back coupling; ■ – direct coupling.

Аналіз мікроструктури показав, що вона є феритно-перлітна з невеликою кількістю структурно вільного фериту, який виділяється на межах аустенітних зерен. Розмір зерна в досліджуваних зразках приблизно однаковий і дорівнює 6–7 балу. Зустрічаються також зерна п'ятого та восьмого балів. Кількість структурно вільного фериту в досліджуваних зразках практично не відрізняється і в середньому дорівнює ~8%. Таким чином, розмір зерна та кількість структурно вільного фериту не могли суттєво вплинути на в'язкість руйнування.

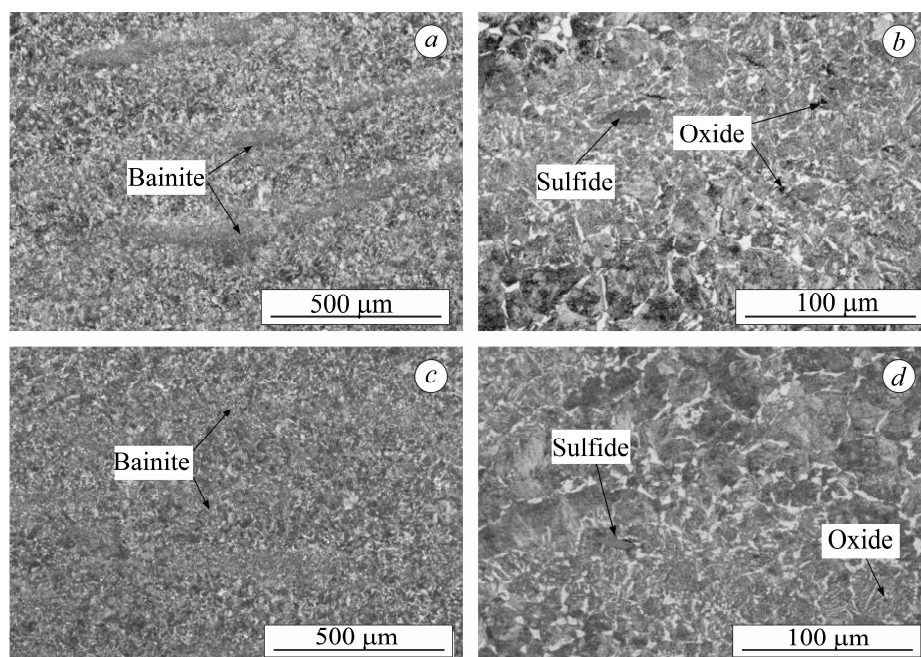


Рис. 2. Мікроструктура досліджуваних зразків: a, b – зразок № 6, $K_{IC} = 85,3 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$, c, d – зразок № 3, $K_{IC} = 106 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$; a, c – $\times 100$; b, d – $\times 200$.

Fig. 2. Microstructure of the studied samples: a, b – sample No 6, $K_{IC} = 85.3 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$, c, d – sample No 3, $K_{IC} = 106 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$; a, c – $\times 100$; b, d – $\times 200$.

Відмінною особливістю мікроструктури досліджуваних зразків є її неоднорідність – на мікроструктурах видно темніші та світліші ділянки на тлі основної структури (рис. 2). Причому у зразку з максимальним значенням в'язкості руйнування вказана неоднорідність практично відсутня. Водночас у зразках з мінімаль-

ним значенням K_{1C} вона виражена сильніше. Аналіз мікроструктури за збільшення $\times 200$ показав (рис. 2b, d), що ці ділянки є бейнітом з характерною для нього голчастою структурою. Така неоднорідна структура негативно впливає на в'язкість руйнування K_{1C} . Аналогічна структура й у інших зразках. При цьому загальна закономірність зберігається – що більше бейніту, то нижча в'язкість руйнування K_{1C} . Так, бейніт у кількості від 10 до 15% призводить до її зниження на 25...36%. Підвищення його кількості в мікроструктурі в середньому на 1% знижує в'язкість руйнування на 2,7%.

Крім того, у цих ділянках структури спостерігали скупчення неметалевих включень (сульфідів та оксидів). Тому ретельно підібраний хімічний склад сталі та заходи для зниження вмісту газів та шкідливих домішок необхідні для зменшення або недопущення утворення неметалевих включень, які можуть діяти як концентратори напружень та потенційні місця зародження тріщини, і, як наслідок, зменшувати в'язкість руйнування.

Неметалеві включення часто можна спостерігати у сталі залізничних коліс. Ефективний спосіб, який впливає на конфігурацію неметалевих включень, є обробка сталі кальцієм, завдяки чому неметалеві включення набувають сферичної форми. Концентрація напружень навколо сферичного включення суттєво знижується, а отже, міцність підвищується [15–21].

Особливо сильно на в'язкість руйнування всіх груп сплавів впливають домішки та легувальні добавки, які спричиняють утворення надлишкових фаз. Зазвичай зі збільшенням концентрації таких елементів у сплаві в'язкість руйнування знижується [7]. Тому підвищення чистоти, а в багатьох випадках і зниження легованості промислових сплавів – один із основних напрямків збільшення їхньої тріщиностійкості.

Надлишкові фази, зростання їхньої об'ємної частки в пластичній матриці завжди знижують в'язкість руйнування. При цьому на відміну від механічних властивостей гладких зразків значення K_{1C} сильно залежать не тільки і часто не стільки від вторинних дисперсних виділень, які утворюються в результаті розпаду твердого розчину, скільки від відносно грубих виділень фаз кристалічного походження [7].

ВИСНОВКИ

Встановлено, що за зміни швидкості охолодження ($1...10^{\circ}\text{C/s}$) вуглецевих сталей з вмістом вуглецю 0,48...0,64 mass% формується структура з різними співвідношенням фериту і перліту та міжпластинчастою відстанню у перліті. При цьому в'язкість руйнування має високий зворотний кореляційний зв'язок зі вмістом хімічних елементів у сталі, зокрема, вуглецю, марганцю та фосфору. Щодо інших механічних властивостей (границь міцності та пластичності, відносних звуження та видовження, ударної в'язкості), встановлено вельми високий зв'язок зі зміною ударної в'язкості та високий – з відносним звуженням. Показано, що за зміни температури аустенітизації ($850...1000^{\circ}\text{C}$) досліджуваних сталей формується структура з різним розміром зерна. При цьому встановлено вельми високий прямий зв'язок в'язкості руйнування та відносних видовження і звуження та ударної в'язкості. Щодо зміни розміру зерна, то він має помірний зв'язок зі зміною в'язкості руйнування. Встановлено негативний вплив структурної неоднорідності у вигляді ділянок з бейнітною структурою (до 15%) на в'язкість руйнування K_{1C} вуглецевої сталі для залізничних коліс ($C \sim 0,47$ mass%). Показано, що бейніт у структурі сталі в кількості від 10 до 15% призводить до зниження в'язкості руйнування K_{1C} на 25...36% порівняно з рівномірною феритно-перлітною структурою (підвищення кількості бейніту в структурі в середньому на 1% викликає зниження в'язкості руйнування на 2,7%).

1. *Mechanical behavior of wheel steels with solid solution and precipitation hardening* / V. V. Kulyk, S. Y. Shipitsyn, O. P. Ostash, Z. A. Duriagina, and V. V. Vira // Archives of Mater. Sci. and Eng. – 2019. – **95**, № 2. – P. 49–54. DOI: 10.5604/01.3001.0013.1730
2. *Babachenko A. I. and Kononenko A. A.* Influence of the chemical composition and structural state on tough properties of steel for railway wheels // *Metallofizika i Noveishie Tekhnologii*. – 2008. – **30**. – P. 227–234.
3. *Influence of the mode of thermal treatment and load ratio on the cyclic crack-growth resistance of wheel steels* / O. P. Ostash, I. M. Andreiko, V. V. Kulyk, O. I. Babachenko, and V. V. Vira // *Materials Science*. – 2009. – **45**, № 2. – P. 211–219. DOI: 10.1007/s11003-009-9177-4
4. *Kulyk V. V., Ostash O. P., and Vira V. V.* Influence of the elevated contents of silicon and manganese on the operating characteristics of high-strength wheel steel // *Materials Science*. – 2019. – **55**, № 2. – P. 143–151. DOI: 10.1007/s11003-019-00281-4
5. *Pelleg J.* Mechanical properties of materials. – Dordrecht: Springer, 2013. – 634 p.
6. *Бабченко О., Кононенко Г.* Тріщиностійкість залізничних коліс. – К.: Наук. думка, 2022. – 132 с.
7. *Segregation stabilizes nanocrystalline bulk steel with near theoretical strength* / Y. Li, D. Raabe, M. Herbig, P.-P. Choi, S. Goto, A. Kostka, H. Yarita, C. Borchers, and R. Kirchheim // *Physical Review Letters*. – 2014. – **113**. – Article number: 106104.
8. *Ultra-strong and damage tolerant metallic bulk materials: A lesson from nanostructured pearlitic steel wires* / A. Hohenwarter, B. Völker, M. W. Kapp, Y. Li, S. Goto, D. Raabe, and R. Pippan // *Scientific Reports*. – 2016. – **6**. – Article number: 33228.
9. *Vakulenko I. O.* Influence of cooling rate on the strength of the rims of railway wheel // *Materials Science*. – 2016. – **51**, № 6. – P. 839–842. DOI: 10.1007/s11003-016-9910-8
10. *Peculiarities of formation of high-carbon steel structure during rolling* / V. A. Lutsenko, E. V. Parusov, O. V. Parusov, O. V. Lutsenko, I. M. Chuiko, and T. M. Golubenko // *Materials Science*. – 2023. – **58**, № 5. – P. 621–628. <https://doi.org/10.1007/s11003-023-00708-z>
11. *Study of two-stage cooling regime of boron and vanadium microalloyed C80D2 steel rolled wire* / V. V. Parusov, E. V. Parusov, L. V. Sagura, A. I. Sivak, A. P. Klimenko, and A. B. Sychkov // *Metallurgical and Mining Industry*. – 2011. – **3**, № 3. – P. 114–118.
12. *Парусов В. В., Сычков А. Б., Парусов Э. В.* Теоретические и технологические основы производства высокоэффективных видов катанки. – Днепропетровск: АРТ-ПРЕСС, 2012. – 376 с.
13. *Thermomechanical testing and modelling of railway wheel steel* / E. V. Landström, E. Steyn, J. Ahlström, and T. Verneris // *Int. J. of Fatig.* – 2023. – **168**. – Article number: 107373. <https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2022.107373>
14. *Influence of the modes of heat treatment on the strength and cyclic crack-growth resistance of 65G steel* / O. P. Ostash, V. V. Kulyk, V. D. Poznyakov, O. A. Gaivorons'kyi, and V. V. Vira // *Materials Science*. – 2019. – **54**, № 6. – P. 776–782. <https://doi.org/10.1007/s11003-019-00263-6>
15. *Analysis of the structure of samples of rail steels of the new generation with improved operational properties. Pt. 2* / O. I. Babachenko, G. A. Kononenko, R. V. Podolskyi, O. A. Safroнова, and O. S. Baskevich // *Metallofizika i Noveishie Tekhnologii*. – 2023. – **45**, № 1. – P. 137–156. <https://doi.org/10.15407/mfint.45.01.0137>
16. *Evolution of non-metallic inclusions in a 303-ton calcium-treated heavy ingot* / Q. Zhou, J. Ba, W. Chen, and L. Zhang // *Metallurgical and Mater. Transact. B*. – 2023. – **54**. – P. 1565–1581. <https://doi.org/10.1007/s11663-023-02786-5>
17. *Effect of calcium treatment on inclusions in H08A welding rod steel* / F. Lan, C. Zhuang, C. Li, G. Yang, and H. Yao // *Metals*. – 2021. – **11**, № 8. – Article number: 1227. <https://doi.org/10.3390/met11081227>
18. *Oxide inclusions in ferromanganese and its influence on the quality of clean steels* / P. W. Han, S. J. Chu, M. E. Ping, and Y. F. Lin // *J. of Iron and Steel Res. Int.* – 2014. – **21**. – P. 23–27.
19. *Effect of calcium treatment on inclusions in Si-Mn-killed 304 stainless steels* / Y. Wang, X. Sun, L. Zhang, and Y. Ren // *J. of Mater. Res. and Technol.* – 2020. – **9**, № 5. – P. 11351–11360. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2020.08.017>
20. *Inclusion variations and calcium treatment optimization in pipeline steel production* / J. Liu, H. Wu, Y. Bao, and M. Wang // *Int. J. of Minerals, Metallurgy, and Mater.* – 2011. – **18**. – P. 527–534. <https://doi.org/10.1007/s12613-011-0473-2>
21. *Webler B. A. and Pistorius P. C.* A review of steel processing considerations for oxide cleanliness // *Metallurgical and Mater. Transact. B*. – 2020. – **51**. – P. 2437–2452. <https://doi.org/10.1007/s11663-020-01949-y>

Одержано 04.09.2023